

垂直监测昆虫雷达研究进展

张 智¹, 张云慧¹, 姜玉英², 石宝才³, 程登发^{1,*}, 焦热光⁴

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 3. 北京市农林科学院植物保护环境保护研究所, 北京 100197; 4. 北京市气象局, 北京 100089)

摘要: 昆虫雷达可以远距离、大范围、快速地探测迁飞昆虫, 这极大促进了人类对昆虫迁飞行为的认识。垂直监测昆虫雷达技术是从 20 世纪 70 年代发展起来的一种监测高空迁飞昆虫种群的新工具。与传统的扫描雷达相比, 垂直监测昆虫雷达可以获得目标的位移速度、位移方向、定向、体型大小和形状等参数, 因此, 对目标的识别能力更为精确。此外, 垂直监测昆虫雷达实现了在微机控制下的自动运行, 这使得应用昆虫雷达开展迁飞昆虫的日常监测成为可能。本文综述了垂直监测昆虫雷达的发展和应, 介绍了设计原理和回波参数的解算方法, 讨论了其存在的不足及改进方案, 最后并对其在未来昆虫雷达网络建设中的应用进行了展望。

关键词: 昆虫; 迁飞; 雷达昆虫学; 昆虫雷达; 垂直雷达; 监测网

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2012)07-0849-11

Progress in vertical-looking insect monitoring radar

ZHANG Zhi¹, ZHANG Yun-Hui¹, JIANG Yu-Ying², SHI Bao-Cai³, CHENG Deng-Fa^{1,*}, JIAO Re-Guang⁴ (1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. National Agro-Technical Extension and Service Centre, Beijing 100125, China; 3. Institute of Plant and Environment Protection, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100197, China; 4. Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China)

Abstract: Entomological radar enables us to visualize individual insects from great distances and to scan huge volumes very rapidly, which contribute much to our understanding of insect migration. Vertical-looking insect monitoring radar (VLR) was developed as a new tool for monitoring high-altitude insect migration in the 1970s. In contrast to the early entomological scanning radar, VLR can provide information about the displacement speed and direction, heading orientation, size and shape of targets. Therefore, VLR has more precise capacity in target identification. Furthermore, VLR systems allow continuous and autonomous monitoring of pest migrations under the control of microcomputer, and this make it practicable to carry out routine monitoring with VLRs. In this article, the history of VLR technologies, their configurations and procedures for signal analysis are reviewed, the limitations and related suggestions are discussed, and finally the perspective of using VLRs in future insect monitoring network is presented.

Key words: Insect; migration; radar entomology; insect monitoring radar; vertical-looking radar; monitoring network

迁徙或迁飞是动物对栖息地资源发生季节性或偶然性变化时的一种适应性行为 (Dingle and Drake, 2007)。昆虫的迁飞现象在自然界普遍存在, 已有的研究证实许多昆虫种类都具有迁飞现象 (陈若簏等, 1989; Drake and Gatehouse, 1995)。昆虫迁飞对人类可产生多方面的影响, 例如: 对农作

物生产造成巨大损失, 传播人和牲畜的疾病, 在生态系统中提供诸如为农作物授粉等基本生态系统服务功能 (Holland *et al.*, 2006)。迁飞性害虫威胁农业生产, 造成严重经济损失, 因此激发了人们研究昆虫迁飞的兴趣 (Dingle and Drake, 2007)。研究害虫迁飞一个非常重要的目标就是发展预警系统, 准

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31101431); 公益性行业科研专项经费 (201003025, 201003079, 200903051)

作者简介: 张智, 男, 1980 年生, 河南沈丘人, 博士研究生, 研究方向为病虫害监测预警及防治决策, E-mail: zhangzhicas@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dfcheng@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2012-04-06; 接受日期 Accepted: 2012-07-06

确预报虫情信息,以便及时采取防治措施,减少或避免损失(Magor, 1995)。监测是预警的基础,因此,采用有效的监测手段和技术,对迁飞性害虫进行长期系统的监测,则成为灾变预警的首要条件(翟保平, 1999)。但是,由于大多数昆虫迁飞发生在夜间,它们的飞行高度远在人类视力范围之外,如果没有专门设备,就无法对其迁飞过程进行直接监测与定量分析。昆虫雷达的出现,使远距离大范围且快速地对迁飞昆虫进行监测成为可能(Chapman, 2000),为监测昆虫迁飞提供了一种无可替代的强有力的工具(Riley, 1989; 翟保平, 1999, 2001; Chapman *et al.*, 2002b, 2011)。

对空中迁飞昆虫进行持续的雷达监测,可以为昆虫迁飞研究等提供非常有用的信息,有利于进一步深化人类对昆虫迁飞行为的认知(Beerwinkle *et al.*, 1993, 1995)。自1968年第一部昆虫雷达诞生以来,国内外学者已经成功地应用扫描雷达对塞内加尔蝗虫 *Oedaleus senegalensis* (Riley and Reynolds, 1979)、非洲粘虫 *Spodoptera exempta* (Riley *et al.*, 1983; Rose *et al.*, 1985)、草地螟 *Loxostege sticticalis* (陈瑞鹿等, 1992; 程登发等, 2005)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Feng *et al.*, 2003; 程登发等, 2005)、粘虫 *Mythimna separata* (Chen *et al.*, 1989) 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Feng *et al.*, 2005; 程登发等, 2005)等多种重大的迁飞害虫进行了监测。但是,利用扫描雷达对害虫种群动态进行日常监测还面临着诸多难题。首先是扫描雷达设备非常复杂,不适宜长期自动运转,数据分析也需要耗费大量的时间与精力(Drake, 1993; 封洪强, 2009);其次,扫描雷达的种类识别能力非常有限,理论上,当波束静止时,如果迁飞昆虫个体在波束中停留的时间足够长,那么系统可以记录到个体的振翅频率(wingbeating frequency),但由于个体之间在同一方向上会发生重叠,某一个体的振翅频率会受到另一个体的干扰,使得扫描雷达依靠振翅频率进行种类鉴定也不可行(Riley and Reynolds, 1997)。如果一种雷达能同时获得目标的体重、形状、振翅频率等参数,那么它对目标的识别能力将显著提高。在此基础上,若能再实现无人值守的长期自动运行分析,那么该类型雷达获得的信息就可以直接用于虫情动态的预警和防治决策。基于上述考虑,科研人员开始研制实用型的垂直监测昆虫雷达(vertical-looking insect monitoring radar)。垂直监测昆虫雷达的出现,是雷达昆虫学发展史上的一个里程碑,它

推动了昆虫雷达由研究型向实用型转变(翟保平, 2001)。它的出现使昆虫迁飞研究,由以往短期而集中的观测,转变为长期的、全自动运行并即时分析的实用型监测(Smith and Riley, 1996; 翟保平, 2001)。经过近40年的发展,垂直监测昆虫雷达在昆虫迁飞监测方面取得了许多重大突破。本文主要综述了垂直监测昆虫雷达的发展和应用,介绍了设计原理和回波参数的解算方法,讨论了其存在的不足及改进方案,最后并对其在未来昆虫雷达网络建设中的应用前景进行了展望。通过此综述,以期垂直监测昆虫雷达在我国应用提供借鉴与参考。

1 垂直监测昆虫雷达的发展和应用概况

1.1 发展历史

垂直监测昆虫雷达的发展始于20世纪70年代初。Atlas等(1970a, 1970b)报道了利用垂直气象雷达对类似昆虫目标的观测结果,并根据信号的变化规律,解算了这些目标的水平迁移速度。受此启发,英国的Riley博士等开始设计用于监测昆虫的垂直雷达,并于1975年将第一台第一代垂直监测昆虫雷达,安放在非洲马里监测蝗虫的迁飞(Riley and Reynolds, 1979; Smith *et al.*, 1993)(表1)。第一代垂直监测昆虫雷达,只引入了极化旋转(polarization rotation),而没有采用章动(nutation)技术。这种雷达系统,由于不知道昆虫目标个体到波束中心的距离,因此,还不能根据信号的振幅大小提取目标昆虫的体型大小信息(Smith *et al.*, 1993),只能获得回波数量、高度和定向角度(orientation 或 body alignment)等参数。如果雷达波束倾斜一个很小的角度,并围绕垂直轴旋转,这样就可以获得目标到波束中心的距离,从而提取到与目标体型大小有关的参数。这项被称为“章动”的技术,当时在跟踪雷达(tracking radar)中的应用已经相当广泛。但真正将这项技术引入垂直监测昆虫雷达的是英国洛桑试验站的Bent博士,当时他试图利用章动技术来估计迁飞蚜虫的体型大小。但是由于缺少必要的财力支持,加之类似蚜虫大小的昆虫,其回波信号的信噪比特别小,得不到可供分析的有效信号,这项工作被迫中止。但是,章动技术可应用于体型较大的昆虫。1985年,英国洛桑试验站成功引入章动技术,研制出第二代垂直监测昆虫雷达样机(图1:A),并分别于1985年和1986年在印度、1990年在澳大利亚进行了样机性能测试。第

二代垂直雷达除了获得数量、高度以外, 还成功提取到位移速度、位移方向(displacement direction)、定向以及到波束中心轴的最短距离和 3 个与体型大小有关的 RCS 参数, 利用这 3 个参数可以估计昆虫的重量和形状(Chapman *et al.*, 2003, 2010)。第二代垂直监测昆虫雷达在毛里塔尼亚进行试验时, 还利用扫描雷达验证了垂直雷达所获数据的准确性(Riley and Reynolds, 1997)。在此之后, 20 世纪 80 年代末, 美国 Beerwinkle 博士等也设计出垂直监测昆虫雷达, 但是美国的这种雷达与英国的第一代垂直雷达相似, 只保留了旋转极化的设计, 放弃了雷达波束的章动(Beerwinkle *et al.*, 1993, 1995), 它由电脑控制, 可全自动观测空中迁飞种群的密度和定向, 并创造了连续运行两年监测昆虫迁飞的记录(翟保平, 2001)。澳大利亚的 Drake 等(2002a)于 20 世纪末期引入垂直监测昆虫雷达技术, 在原来

锥扫模式(conical-scan operating mode)的基础上, 又引入了静止波束模式(stationary beam mode)(图 1: B)。两种运行模式下, 除了可获得英国垂直监测昆虫雷达的全部参数以外, 还可以提取振翅频率, 这项技术进一步提高了垂直监测昆虫雷达对空中目标的识别能力。

中国研制垂直监测昆虫雷达的工作起步较晚。1996 年, 南京农业大学与全国农业技术推广服务中心合建了多普勒垂直谐波雷达; 2004 年, 中国农业科学院植物保护研究所与成都锦江电子有限公司合作研制了中国第一台厘米波(3.2 cm)垂直监测昆虫雷达(图 1: C)(张云慧等, 2007b); 2008 年, 北京市农林科学院也建立了一台参数相同的垂直监测昆虫雷达。近年来, 河南省农业科学院正在按照国际标准研制第二代垂直监测昆虫雷达(封洪强, 2009)。



图 1 不同国家的垂直监测昆虫雷达

Fig. 1 Vertical-looking insect monitoring radars in different countries

A: 英国 U. K.; B: 澳大利亚 Australia; C: 中国 China.

1.2 监测应用

自 1975 年第一代垂直监测昆虫雷达成功问世以来, 已经在多个国家多种昆虫监测上进行了应用, 包括塞内加尔蝗虫、非洲粘虫、沙漠蝗 *Schistocerca gregaria*、小菜蛾 *Plutella xylostella*、银丫纹夜蛾 *Autographa gamma*、澳洲疫蝗 *Chortoicetes terminifera*、澳洲棉铃虫 *Helicoverpa punctigera*、草地螟、旋幽夜蛾 *Scotogramma trifolii* 等(表 1)。目前, 虽然有多个国家都建立了垂直监测昆虫雷达, 但是在技术方面比较成熟的国家仍然是英国和澳大利亚。从 1999 年开始, 英国洛桑试验站在英国南部安放了两台垂直雷达, 除了对重要的农业害虫进行长期监测以外, 还对空中生物流量、天敌昆虫的伴随迁飞等进行研究(Chapman *et al.*, 2003, 2010)。澳大利亚从 1998 年开始, 在 Thargomindah 和

Bourke 两地分别安放一台垂直监测昆虫雷达, 开展澳洲疫蝗和澳洲棉铃虫的迁飞监测(Drake *et al.*, 2001)。而且澳大利亚的两台垂直监测昆虫雷达通过电话线和互联网实现数据的传输, 已经形成了一个小型雷达监测网络(Drake *et al.*, 2002b)。

2 垂直监测昆虫雷达的设计原理与参数解算

2.1 设计原理

垂直雷达系统主要包括天线、发射机、电脑控制及信号分析系统。与传统的扫描昆虫雷达相比, 垂直监测昆虫雷达的抛物面型天线竖直向上固定, 双极馈源(double-dipole feed)稍微偏离抛物面的对称轴, 向上发射圆形对称的波束。竖直向上的波导

表 1 垂直监测昆虫雷达在迁飞昆虫监测中的应用

Table 1 Observations of insect migration by vertical-looking radar

国家 Countries	时间 Time	监测事件 Observation events	参考文献 References
马里 Mali	1975, 1978	英国研制的第一代垂直监测昆虫雷达, 监测塞内加尔蝗虫。Vertical-looking radar of the first generation of the U. K. was operated in Mali to observe some grasshopper species.	Riley and Reynolds, 1979, 1983
肯尼亚 Kenya	1982	英国研制的第一代垂直监测昆虫雷达与扫描昆虫雷达联合观测非洲粘虫。Both the vertical-looking radar of the first generation and the scanning radar of the U. K. were operated together in Kenya to observe African armyworm moths.	Rose <i>et al.</i> , 1985
印度 India	1985, 1986	英国研制的第二代垂直雷达样机的试验阶段。Vertical-looking radar prototypes of the second generation which combined polarization rotation with beam nutation were tested in India.	Smith <i>et al.</i> , 2000
美国 USA	1990, 1991	美国研制的垂直监测昆虫雷达, 与英国第一代垂直雷达类似, 主要监测夜蛾类。The vertical-looking radar of the U. S. A which is similar to the first generation of the U. K. was operated to observe the long distance movement of noctuids.	Beerwinkle <i>et al.</i> , 1993, 1995
澳大利亚 Australia	1991	英国第二代垂直监测昆虫雷达的试验阶段。Vertical-looking radar prototypes of the second generation were tested in Australia.	Smith <i>et al.</i> , 1993
毛利塔尼亚 Mauritania	1993, 1994	具有新算法的第二代垂直监测昆虫雷达监测沙漠蝗。Vertical-looking radar of the second generation with the analytical capability was operated in Mauritania to observe the desert locusts.	Riley and Reynolds, 1997
英国 U. K.	1995	测试具有新算法的第二代垂直监测昆虫雷达日常监测时的性能。Vertical-looking radars of the second generation with the analytical capability were tested as a long-term migration monitor.	Smith <i>et al.</i> , 2000
中国 China	1996	南京农业大学与全国农技推广中心合作建立多普勒垂直谐波雷达。Doppler insect monitoring radar was set up by Nanjing Agricultural University and National Agro-technical Extension and Service Centre in China.	姜玉英, 2006
英国 U. K.	1999 – 至今 present	在英国南部安置了两台垂直雷达, 开展昆虫迁飞的长期监测。第一台从 1999 年开始, 一直安放在洛桑。第二台是 2000 年设置的, 2000–2003 年, 安放在 Malvern, 2004 至今安置在 Chilbolton。主要监测了小菜蛾、银丫纹夜蛾等。Two purpose-built, vertical-looking entomological radars were deployed in inland southern England. The first has been at Rothamsted from 1999 to present; the second at Malvern from 2000 to 2003, and then at Chilbolton from 2004 to present. Mass migration events of many insect species such as <i>Plutella xylostella</i> and <i>Autographa gamma</i> were observed with those radars.	Chapman <i>et al.</i> , 2003, 2010
澳大利亚 Australia	1998 – 至今 present	在 Thargomindah 和 Bourke 两地分别安放一台垂直雷达对澳洲疫蝗和澳洲棉铃虫的联网监测。Insect monitoring radars were deployed respectively in Thargomindah and Bourke to observe the <i>Chortoicetes terminifera</i> and <i>Helicoverpa punctigera</i> through networking.	Drake <i>et al.</i> , 2002b
中国 China	2004 – 至今 present	建立一台厘米波垂直雷达, 先后在四川、吉林、内蒙等地进行了昆虫迁飞监测。The first vertical looking radar was set up by Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, it was operated in Sichuan, Jilin and Inner Mongolia, respectively, to observe the most important insect pests in China.	张云慧等, 2007a, 2007b, 2008

馈源(wave-guide feed)围绕垂直轴进行机械转动,使得垂直波束的线性极化(linear polarization)也不断旋转(图2)。同时,馈源也围绕抛物面的轴线旋转,使得垂直向上的波束围绕轴线进行锥扫(Smith *et al.*, 1993; Smith and Riley, 1996; Chapman *et al.*, 2003)。Drake(1993)将这种设计概括为ZLC设计(the zenith-pointing linearly-polarised conical-scan configuration)模式,即垂直向上、旋转极化和锥形扫描。为了减少旁瓣(side lobe)以及地物杂波的干扰,垂直监测昆虫雷达设计时还采取了多项措施,例如竖直向上的天线边缘增加了高约30 cm内部贴有吸收微波的材料圆形金属护罩。这个护罩不但可以消除一些旁瓣的影响,同时也可减少了对周围人员的电磁波辐射(Beerwinkle *et al.*, 1993; Smith *et al.*, 1993)。为了获得理想的信号,当目标穿越波束时,应保证目标被扫描10次以上。因为目标穿越波束的最短时间约为2 s,因此,要求馈源转动频率至少应为5 Hz(即每分钟300转)。实际工作中,Smith和Riley(1996)推荐的旋转频率为6.25 Hz(即每分钟375转)。

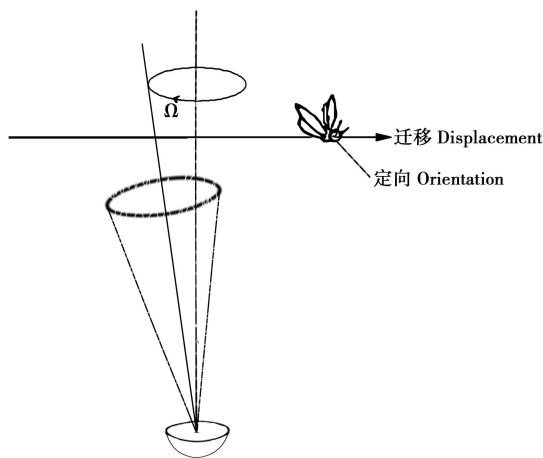


图2 垂直监测昆虫雷达的立体示意图(仿 Smith *et al.*, 1993)
Fig. 2 Elevation view of vertical-looking insect monitoring radar
(adapted from Smith *et al.*, 1993)

根据接收机(transceiver)开启信号接收所设定的时间间隔,目前英国和澳大利亚的垂直监测昆虫雷达,对雷达上方盲区以上空间进行目标探测时,获取的数据是按照距离门(range gate)进行取样。距离门的数量、盲区范围、非取样区高度都与雷达性能有关。英国垂直监测昆虫雷达的盲区是150 m,150~1 140 m的探测空间共分为15个距离门,每一个距离门的取样范围45 m,与下一距离门间隔26 m的非取样区(图3)(Smith and Riley, 1996;

Smith *et al.*, 2000; Chapman *et al.*, 2003)。探测空间的上限值1 140 m是雷达的最大探测距离,这个数值受天线增益和探测目标大小的共同影响,在天线增益改变时,最大探测距离会发生变化。澳大利亚垂直监测昆虫雷达取样的起始高度为200 m,共分8个距离门,每个距离门是333 ns,间隔1 000 ns的非取样区,换算成距离,取样高度为50 m,间隔150 m的非取样区(Drake, 2002a)。

英国的垂直雷达软件包括两个主菜单,一个用于雷达控制、数据存储和数据分析,另一个用于展示或导出分析得到的结果。控制部分有两个选择,如果选择手动模式,程序要求操作人员输入需要分析的数据集以及距离门的数量。手动模式下,在数据获取阶段,计算机会暂时存储15个距离门的基数据,但是只分析所选定距离门的数据。自动模式下,会分析全部距离门的数据(Smith and Riley, 1996)。

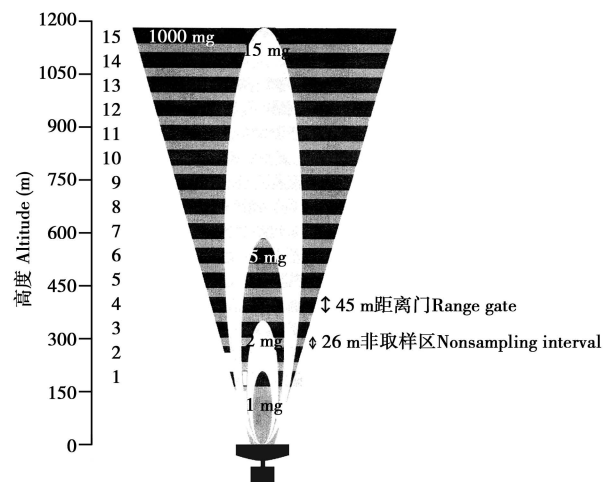


图3 垂直监测昆虫雷达的取样模式示意图
(仿 Chapman *et al.*, 2003)

Fig. 3 Sampling regime of the vertical-looking insect monitoring radar (adapted from Chapman *et al.*, 2003)

2.2 运转模式及参数解算

目前,垂直监测昆虫雷达的运行模式有两种,一种为锥扫模式,另一种是澳大利亚的Drake博士提出的静止波束模式。静止波束模式就是指天线不转动的情况下对目标进行探测。英国的垂直雷达只有锥扫模式,每30 min为一次循环,5 min时间收集数据,其余25 min完成数据分析(Smith and Riley, 1996),后来改进为15 min为一次循环,5 min收集数据,数据分析为10 min(Chapman *et al.*, 2003; Riley *et al.*, 2003)。澳大利亚的雷达是两种

模式交替运行,一个运行周期大约 1 h,首先锥扫 17 min,然后运行静止波束模式 10 min,接着再锥扫 17 min,最后进行自检和性能优化完成一个运行周期(Drake *et al.*, 2002a)。

2.2.1 锥扫模式: (a) 参数解算: 当一个昆虫穿越雷达波束时,其回波的变化主要取决于昆虫的雷达散射特性和它的轨迹(Smith *et al.*, 1993)。轨迹影响昆虫纵轴与极化方向的夹角。当雷达波束的极化方向与身体纵轴平行时,返回的回波信号最强,极化方向与纵轴垂直时,返回的信号最弱。因此,对于一个给定个体的回波信号,其振幅会随馈源转动而发生变化,根据这个原理,可以测量飞行个体的定向(Beerwinkle *et al.*, 1993)。垂直监测昆虫雷达引入旋转极化的原因是希望雷达扫描昆虫时,昆虫可以像纺锤体一样反射电磁波。由于瘦长型昆虫对旋转极化的反应比短圆型的敏感,因此,有助于进行体型判断(Smith *et al.*, 1993)。第二代垂直监测昆虫雷达,引入章动技术后,通过计算可以获得目标到波束中心的距离这个参数。因此,通过对信号解译,可以获得与体型大小有关的参数。

昆虫的雷达反射截面 RCS 是昆虫纵轴与极化方向之间的夹角(ϕ) (图 4) 的函数[公式(1)]。其中 α_0 , α_2 和 α_4 是与体型大小、形状和虫体本身的电解质性质有关的 3 个参数。

$$\sigma(\phi) = \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2\phi + \alpha_4 \cos 4\phi \quad (1)$$

当昆虫在波束中穿行时,雷达波束也在章动,因此,昆虫个体接收到雷达信号强度也是变化的。对于稍微倾斜的天线,其增益变化近似符合高斯方

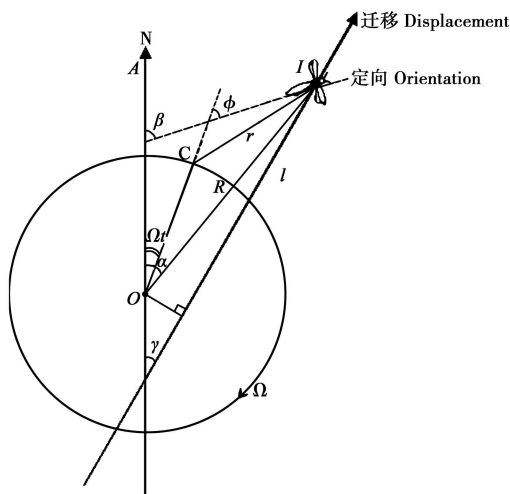


图 4 目标飞行路线在雷达波束中相对位置的几何平面图 (仿 Smith *et al.*, 1993)

Fig. 4 Plan of the geometry of the flight path and the VLR beam (adapted from Smith *et al.*, 1993)

程[公式(2)] (Smith *et al.*, 1993)。其中 G_0 是沿垂轴上的增益, $k = 8 \ln 2$, r 是波束中心轴到垂直轴的距离。

$$G(r) = G_0 \exp\left(-\frac{1}{2}kr^2\right) \quad (2)$$

将公式(1)和公式(2)合并后,在某一时刻 t , 天线接收到的信号强度可以表示为公式(3)。C 是与雷达发射功率、探测范围等有关的一个常数。

$$f(t) = C \exp(-kr^2) \{ \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2\phi + \alpha_4 \cos 4\phi \} \quad (3)$$

其中公式(3)中各个参数又可以表示为如下形式(图 4):

$$\phi = \Omega t - \beta \quad (4)$$

$$r^2 = \Delta^2 + R^2 - 2\Delta R \cos(\Omega t - \alpha) \quad (5)$$

$$\text{其中 } \angle \alpha = \text{IOA}$$

$$R^2 = V^2(t - \tau)^2 + \rho^2 \quad (6)$$

把上述公式合并后,天线接收到的回波信号的强度最终可以表示为公式(7)。这个公式中, k , C , Ω 和 Δ 都是已知的常数,剩余的参数取决于昆虫和它的飞行行为。根据接收到的信号强度,利用傅里叶变换(Fourier transform)求出公式(7)的剩余参数(Smith *et al.*, 1993)。详细方法参考 Smith 等(1993)和 Chapman 等(2002b)。

$$f(t) = C \{ \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2(\Omega t - \beta) + \alpha_4 \cos 4(\Omega t - \beta) \} \times e^{-k(\Delta^2 + \rho^2)} e^{-kV^2(t-\tau)^2} \exp 2k\Delta \{ V(t - \tau) \cos(\Omega t - \gamma) + \rho \sin(\Omega t - \gamma) \} \quad (7)$$

通过解算,提取到位移速度、位移方向、定向角度、到波束中心轴的最短距离和 3 个与体型大小有关的 RCS 参数。为了验证数据的准确性,可利用这些参数模拟产生一个信号,然后将模拟信号和实际信号进行相关分析。当相关系数 > 0.9 时,表明提取到的参数非常可靠(Smith *et al.*, 2000)。进一步分析时,多数情况下只分析相关系数大于 0.9 的回波信号,这样可以去除雨滴和其他非生物目标的回波(Chapman *et al.*, 2003)。根据提取到的参数和雷达探测范围,可以在众多的昆虫回波中,挑选特定类群进行细致分析,以避免其他回波所提取的参数影响特定类群的数据(Chapman *et al.*, 2002a, 2010)。

(b) 体型和重量计算: 根据解算出的 3 个与昆虫 RCS 有关的参数,可以计算探测目标的两个主要的雷达反射截面 σ_{xx} 和 σ_{yy} [公式(8)和(9)], σ_{xx} 是极化旋转时雷达反射截面(RCS)的最大值, σ_{yy} 是指与出现 σ_{xx} 时的极化方向相垂直方向上的 RCS。

根据 $\sigma_{xx} : \sigma_{yy}$ 的值, 可以对目标的体型进行估计, 当比值为 15:1 时, 一般是瘦长型的昆虫, 例如草蛉等; 当比值为 5:1 时, 可能是体长相对较短的甲虫类; 当比值为 1:1 时, 可能是半球形的昆虫如瓢虫等 (Chapman *et al.*, 2003)。

$$\sigma_{xx} = \alpha_0 + \alpha_2 + a_4 (\text{cm}^2) \quad (8)$$

$$\sigma_{yy} = \alpha_0 - \alpha_2 + a_4 (\text{cm}^2) \quad (9)$$

根据 σ_{xx} 和 σ_{yy} 的值, 可以按照 Chapman 等 (2002b) 的文章中推荐的计算公式, 估算目标的重量 (Chapman *et al.*, 2002b)。

空中目标的密度会影响回波信号的分析解算。当目标密度过高时, 个体之间会相互干扰, 导致垂直监测雷达系统无法对个体进行细致分析, 而只能对空中目标的密度进行大致估算 (Drake, 1993)。

2.2.2 静止波束模式: 垂直雷达波束的旋转引起雷达回波发生变化, 这些变化淹没了由昆虫本身引起的信号调制。因此, 锥扫模式下, 探测不到振翅频率。在静止波束模式下, 在获得飞行速度的同时, 可以获得振翅频率和其他反应信号调制本质的参数 (Drake *et al.*, 2002a)。这些参数在回波目标识别中具有非常重要的潜在价值 (Drake, 2002)。原有锥扫模式的基础上引入静止波束模式后, 出现了两个意想不到的结果。首先, 那些可以获取振翅频率参数的个体, 不能获得定向、体型大小等参数。其次, 减少了获取数据的时间 (Drake *et al.*, 2002a)。静止模式下, 考虑到昆虫定向与极化方向的关系, 以及昆虫有共同定向 (common orientation) 行为等因素, 因此, 需要设置多个极化角度, 来增加所得回波的代表性。澳大利亚的垂直监测昆虫雷达是每隔 60° 观察一次, 每一个角度下运行 157 s。静止波束模式下, 回波信号经过复杂的解算, 可以获得飞行速度、振翅频率、振翅引起的调制深度 (depth of wingbeat modulation)、谐波含量 (harmonic content) 等参数 (Drake *et al.*, 2002a)。

2.3 空间密度与探测体积的计算

雷达探测到的目标数量只有在转变为空间密度值后, 才更具有生物学意义, 也便于不同雷达观测数据之间进行比较。垂直监测昆虫雷达的空间密度可按公式 (10) 进行计算。

$$\rho = \frac{Nl}{V_s vt} \quad (10)$$

其中 N 是探测到的昆虫数量, l 是横向长度 (horizontal length), V_s 是探测体积 (sensed volume), v 风速均值, t 探测持续的时间, 计算出的最终单位

是 m^{-3} 。

根据公式 (10), 要计算昆虫的空间密度必须计算雷达的探测体积和横向长度。

雷达的探测体积随着目标昆虫的重量变化而改变, 因此, 必须针对特定目标昆虫, 计算其相应的探测体积 (图 3)。英国垂直雷达的上方 150 m 处, 对目标的最小分辨率约是 1 mg。类似大小的目标只能在第一距离门中才能被探测到。如果是 15 mg 以上的目标, 所有 15 个距离门中都可以探测到 (图 3) (Chapman *et al.*, 2003)。由于垂直监测昆虫雷达的距离门之间有非取样区, 计算探测体积必须将其排除。最终计算出的体积是对应某种体型大小目标的可探测范围内某一特定距离门的探测体积。具体可按公式 (11) 进行计算 (Chapman *et al.*, 2002b)。

$$V_s = \frac{\pi \theta_{3dB}^2}{18 \ln 2} \left\{ r_0^3 \left[\left(\frac{r_2}{r_0} \right)^3 - \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 \right] + 3 \left[r_2^3 \ln \left(\frac{r_0}{r_2} \right) - r_1^3 \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

横向长度的计算公式如下:

$$l = 2 \times (\alpha_m^2 - p_m^2)^{0.5} \quad (12)$$

在横向长度计算时, 又涉及两个参数 α_m 和 p_m , 其中 α_m 为横向半径 (horizontal radius), 可以将探测体积 (V_s) 和距离门到雷达天线的距离 (图 5) 代入公式 (13) 进行计算获得 α_m 值。在回波信号解算时获得目标到波束中心的最近距离 (P 值) 以后, 可以按照公式 (14) 计算 p_m 。

$$\alpha_m = \{ V_s / \pi (r_2 - r_1) \}^{0.5} \quad (13)$$

$$P_m = \{ (r_1 + r_2) / 2 \} \times \sin(\theta_{3dB} \times P) \quad (14)$$

其中, r_1 和 r_2 分别为某一距离库的上限边缘和下限边缘到天线的距离 (图 5)。

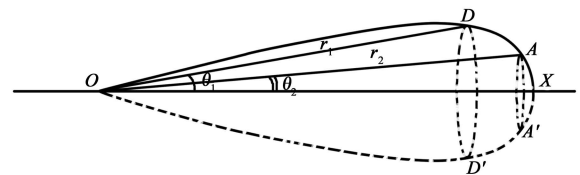


图 5 圆形高斯波束的等值廓线所包围的体积

(仿 Chapman *et al.*, 2002)

Fig. 5 An illustration of the volume enclosed by an iso-echoic contour of a circular, Gaussian beam (adapted from Chapman *et al.*, 2002b)

3 垂直监测昆虫雷达的局限性及改进

与传统的扫描昆虫雷达相比, 垂直监测昆虫雷达在目标识别能力、自动化运行等方面有很大提

高,但仍存在一定的局限性。

首先,是取样空间太小(波束直径 30 m),垂直监测昆虫雷达只能提供某一地点的数据,而且只能检测飞越其正上方的个体(Drake, 1993)。尽管早期的扫描昆虫雷达监测已经明确,迁飞个体在空中的分布除了起飞阶段外,大部分时间内都呈均匀分布(Drake, 1993),这在一定程度上会减小取样空间较小带来的不利影响,但是当其空间分布不均匀时,会造成严重误差。

其次,由于发射与接收之间存在时间延迟,造成了雷达上方 150 m (Chapman *et al.*, 2003)或 200 m (Drake *et al.*, 2002a)的探测盲区,因此,导致垂直监测昆虫雷达无法获得这一空间内昆虫的活动情况。未来在减小盲区方面,采取将雷达的发射与接收分离变为双基(dual-dish)或许可以解决这个问题(Chapman *et al.*, 2011)。Bent 博士曾于 20 世纪 80 年代设计了这样的样机,但是不幸的是,如此复杂的系统,还没有达到可操作阶段(Chapman *et al.*, 2003)。另外一个解决方案是利用调频连续波雷达(frequency-modulated continuous-wave radar),这些技术方面的问题仍需要进一步探索(Chapman *et al.*, 2003)。

第三,目前的垂直监测昆虫雷达是厘米波段,对类似蚜虫大小的昆虫还无法识别(Smith *et al.*, 2000)。毫米波昆虫雷达可以观察类似蚜虫大小的昆虫(Chapman *et al.*, 2004),但是毫米波雷达部件价格昂贵,许多部件需要定制,加之昆虫学研究获得的经费有限,这些都限制了毫米波垂直监测昆虫雷达研究的开展(Chapman *et al.*, 2004)。此外,由于毫米波(8.8 mm)垂直监测昆虫雷达的有效监测高度最低约为 580 m,如果监测 300 ~ 580 m 范围内,类似稻飞虱大小的昆虫,需要引入双天线技术(Riley *et al.*, 2003)。目前,这一技术还处于探索之中。未来随着毫米波雷达技术的进步,可在 3.2 cm 的厘米波垂直监测昆虫雷达旁边,安放 9 mm 或 3 mm 的毫米波垂直监测昆虫雷达。届时,蛾类、蝗虫、飞虱、蚜虫均能被探测(Chapman *et al.*, 2011)。

第四,当昆虫密度比较高时,个体之间的回波信号会产生干扰,这会导致分析程序失灵,得不到与目标有关的参数信息。如果碰巧此时发生了比较重要的迁飞行为,那么就会错失了收集这些重要信息的机会(Smith *et al.*, 2000)。随着计算机技术的进步,未来可以记录解算全部的信号(Chapman *et*

al., 2004)。

第五,尽管垂直监测昆虫雷达的识别能力有了全面提高,但是探测到的目标昆虫仍不能准确地鉴定到物种水平。仍然需要综合网捕、地面灯诱等辅助手段,进行综合识别鉴定(Chapman *et al.*, 2002; 封洪强, 2009)。此外,Drake 等(2002a)利用静态天线模式已经成功解算出与识别种类有关的振翅频率参数,但是振翅频率和其他参数仍不能同时获得。随机解算方法的进步,未来或许可以同时获得这些参数,或者使用单脉冲跟踪技术测量昆虫的振翅频率(Chapman *et al.*, 2003)。

4 小结与展望

垂直监测昆虫雷达技术基于成熟的海事雷达技术和个人电脑,与传统的扫描昆虫雷达相比,垂直雷达结构简单,造价低廉,数据采集量小,基本实现了设备运转和信号采集、存储和处理分析的自动化运行,而且,垂直监测昆虫雷达对目标的识别能力有了大幅度提高(Riley and Reynolds, 1997; Riley *et al.*, 2003)。未来,结合空中网捕技术和生物气象学资料,垂直监测昆虫雷达系统有望在重大害虫大范围监测方面发挥其巨大的潜能,有助于害虫管理与预警系统的建立(Drake *et al.*, 2001)。此外,利用垂直监测昆虫雷达对成层(layering)和共同定向(common orientation)进行研究,可为昆虫行为学研究提供新的见解,对学术研究和应用昆虫学都会产生显著的贡献(Smith *et al.*, 1993; Drake *et al.*, 2001)。昆虫的迁飞并不是一个孤立的过程,除了自身种群在寻找新的适合的栖息地资源而产生重新分布以外,还可能导致以昆虫为食的鸟类和蝙蝠的种群发生变动(Chapman *et al.*, 2003)。垂直监测昆虫雷达的长期、自动监测,可为食虫类脊椎动物种群评估时提供一个营养方面的基础数据,还可以用于研究全球气候变暖、土地利用变化等引起的大尺度生态效应(Chapman *et al.*, 2003)。

昆虫迁飞是一种大范围、大尺度事件,因此,要弄清昆虫的迁飞规律,必须开展大范围、长时间的监测。许多雷达昆虫学家都提出在昆虫迁飞的主要通道上,安放一系列的垂直监测昆虫雷达,组成昆虫雷达网进行监测,这样可以揭示昆虫迁飞行为的时空变化,以及迁飞随季节、风和天气的变化(翟保平, 2001; Chapman *et al.*, 2003; 封洪强, 2009)。澳大利亚 Drake 博士等在雷达组网方面进

行了有益的探索,两台垂直监测昆虫雷达通过电话网络进行数据传输,从而可以在远端获取实时监测数据,经过进一步分析之后,将获得的虫情信息通过互联网进行发布。通过组网,当夜观测数据的汇总结果,在第2天下午就可以分发给研究人员和害虫管理机构,管理部门根据雷达监测的虫情,就可以及时制定相应的防控措施(Drake *et al.*, 2002)。随着雷达监测网以及相应灾变预警和决策支持系统的建立,将来有望实现对迁飞性害虫进行“空对空”的防治(翟保平, 2001)。

中国地处东亚季风区,褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、白背飞虱 *Sogatella furcifera*、粘虫、草地螟等都具有大区域迁飞性、暴发性和毁灭性的特点。迁飞性害虫的突发性给预测预报带来了很大难度,在防治决策上往往处于被动地位(翟保平, 1999)。因此,更迫切在害虫发生的广大区域建立雷达监测网,进行大范围、多对象的连续监测,估测迁飞害虫在特定季节、特定时间、特定迁飞方向与特定环境下的发生情况(姜玉英, 2006)。虽然中国已经建立了几台垂直监测昆虫雷达,并在四川、内蒙、北京、吉林、山东和河南等地对草地螟、棉铃虫等开展了系统的监测(张云慧等, 2007a, 2007b, 2008; 封洪强, 2009)。但是目前我国的垂直监测昆虫雷达,只能获得数量、方位、高度等参数,其技术仍有待于完善,其信号分析水平有待于进一步提高。

随着电子技术的进步,构建垂直监测昆虫雷达系统时,可以应用许多先进的新技术。但是,受昆虫学项目资助的限制,构建昆虫雷达系统时引入最新技术,开展多方面的研究是不切实际的。受气象信息服务需求的推动,气象雷达的发展非常迅速。很多国家都有专门气象雷达监测网络,例如美国已经建立了气象监测多普勒雷达网络(WSR-88D; <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/88d/doppler.php>)和全国海洋大气监测网络(NPN; <http://www.profiler.noaa.gov/npn/aboutNpnProfilers.jsp>)。在昆虫学经费不足的情况,雷达昆虫学家可与雷达气象专家合作,借助气象雷达的优势共同开展垂直监测昆虫雷达的研究和昆虫迁飞的监测工作,共同推进昆虫雷达的发展与进步(Chapman *et al.*, 2003)。

中国计划部署200多部新一代天气雷达,现已完成150多部,已形成基本覆盖全国的天气雷达监测网,其中沿海地区和暴雨多发区布设的为S波段多普勒天气雷达,其余内陆地区为造价便宜的C波段多普勒天气雷达。目前,这些天气雷达常年24

小时不间断运行,所获得的基数据和产品数据实时全自动上传至国家气象中心。现代多普勒天气雷达对接收到的全相参信号进行FFT处理,从而获得回波强度、径向速度和谱宽这3个基本参数的空间分布,进而生成产品数据。现代天气雷达所设计的性能指标很高,我国通过和美国洛克希德-马丁公司建立合资企业,带动国内企业生产制造出CinRad-SA全相参多普勒天气雷达,比美国WSR-88D天气雷达又有改进。由于云滴和雨滴尺寸大小的变化很大,从微米量级到厘米量级的云滴或雨滴都有可能存在。根据瑞利散射理论,粒子后向散射能力和其直径的六次方成正比,因此,气象雷达回波强度的变化范围很大,这就要求天气雷达接收机的动态范围必须很大,噪声电平必须很低。CinRad-SA接收机动态范围达93 db,噪声系数4 db,发射机峰值输出功率大于650 kw,探测范围达460 km,这使得天气雷达探测昆虫回波成为可能。国内的天气雷达已经观测到昆虫、鸟类、飞机等非气象回波,北京气象局的多普勒天气雷达已经发现昆虫的起飞、定向、遇雨降落等现象。目前,我国昆虫雷达网络建设与发展所面临的困难与国外类似。在国内垂直监测昆虫雷达研究经费不足,技术不完善的情况下,也可以借鉴中国已经建立的天气雷达网络的运行经验和技术,开展昆虫迁飞的研究工作,为今后建立专用的昆虫雷达网提供技术支持。

致谢 论文撰写时,澳大利亚的新南威尔士大学V. A. Drake博士和英国洛桑试验站的Jason Chapman博士和K. S. Lim博士提供了许多雷达方面的文献资料与照片,特别是K. S. Lim博士仔细阅读了本文,指正了翻译的错误,对全文结构提出了很好的建议,并润色了本文的摘要;在插图绘制时,河南农业大学植物保护学院2008级本科生陈青召同学提供了诸多帮助;文献查阅时,中国科学院动物研究所的王江宁博士和河北农业大学的蔡小娜博士提供了很多便利。在此一并致谢。

参 考 文 献 (References)

- Atlas D, Harris FI, Richter JH, 1970a. Measurement of point target speeds with incoherent non-tracking radar: insect speeds in atmospheric waves. *Journal of Geophysical Research*, 75 (36): 7588 - 7595.
- Atlas D, Metcalf JJ, Richter JH, Gossard EE, 1970b. The birth of 'CAT' and microscale turbulence. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(6): 903 - 913.

- Beerwinkle KR, Lopez JDJ, Schieider PG, Lingren PD, 1995. Annual patterns of aerial insect densities at altitudes from 500 to 2400 meters in East-Central Texas indicated by continuously-operating vertically-oriented radar. *Southwestern Entomologist Supplement*, (18): 63–79.
- Beerwinkle KR, Witz JA, Schleider PG, 1993. An automated, vertical looking, X-band radar system for continuously monitoring aerial insect activity. *Transactions of the ASAE*, 36(3): 965–970.
- Chapman JW, Drake VA, Reynolds DR, 2011. Recent insights from radar studies of insect flight. *Annual Review of Entomology*, 56: 337–356.
- Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK, 2010. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science*, 327(5966): 682–685.
- Chapman JW, Reynolds D, Smith AD, 2004. Migratory and foraging movements in beneficial insects: a review of radar monitoring and tracking methods. *International Journal of Pest Management*, 50(3): 225–232.
- Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, 2003. Vertical-looking radar: a new tool for monitoring high-altitude insect migration. *Bioscience*, 53(5): 503–511.
- Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, Riley JR, Pedgley DE, Woidod IP, 2002a. High-altitude migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* to the U. K. : a study using radar, aerial netting, and ground trapping. *Ecological Entomology*, 27(6): 641–650.
- Chapman JW, Smith AD, Woiwod IP, Reynolds DR, Riley JR, 2002b. Development of vertical-looking radar technology for monitoring insect migration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2–3): 95–110.
- Chapman RF, 2000. Entomology in the twentieth century. *Annual Review of Entomology*, 45(1): 261–285.
- Chen RC, Ding JH, Tan HQ, Hu GW, 1989. Migration Entomology. China Agriculture Press, Beijing. [陈若簾, 丁锦华, 谈涵秋, 胡国文, 1989. 迁飞昆虫学. 北京: 农业出版社]
- Chen RL, Bao XZ, Drake VA, Farrow RA, Wang SY, Sun YJ, Zhai BP, 1989. Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecological Entomology*, 14(2): 149–162.
- Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Liu JR, 1992. An observation on the migration of meadow moth by radar. *Acta Phytophylacica Sinica*, 19(2): 171–174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 1992. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 19(2): 171–174]
- Cheng DF, Feng HQ, Wu KM, 2005. Scanning Entomological Radar and Its Monitoring on Insect Migration. Science Press, Beijing. [程登发, 封洪强, 吴孔明, 2005. 扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测. 北京: 科学出版社]
- Dingle H, Drake VA, 2007. What is migration? *Bioscience*, 57(2): 113–121.
- Drake VA, 1993. Insect monitoring radar: a new source of information for migration research and operational pest forecasting. In: Corey SA, Dall DJ, Milne WM eds. Pest Control and Sustainable Agriculture. CSIRO Publications, Melbourne. 452–455.
- Drake VA, 2002. Automatically operating radars for monitoring insect pest migrations. *Insect Science*, 9(4): 27–39.
- Drake VA, Gatehouse AG, 1995. Insect Migration: Tracking Resources through Space and Time. Cambridge University Press, Cambridge.
- Drake VA, Gregg PC, Harman IT, Wang HK, Deveson ED, Hunter DM, Rochester WA, 2001. Characterizing insect migration systems in inland Australia with novel and traditional methodologies. In: Woiwod IP, Reynolds DR, Thomas CD eds. Insect Movement: Mechanisms and Consequences. Proceedings of the Royal Entomological Society's 20th Symposium. CABI Publishing, Wallingford. 207–233.
- Drake VA, Harman IT, Wang HK, 2002a. Insect monitoring radar: stationary-beam operating mode. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2–3): 111–137.
- Drake VA, Wang HK, Harman IT, 2002b. Insect monitoring radar: remote and network operation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2–3): 77–94.
- Feng HQ, 2009. Review and perspective of radar entomology research for forty years. *Henan Agricultural Science*, (9): 121–126. [封洪强, 2009. 雷达昆虫学 40 年研究的回顾与展望. 河南农业科学, (9): 121–126]
- Feng HQ, Wu KM, Cheng DF, Guo YY, 2003. Radar observations of the autumn migration of the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in northern China. *Bulletin of Entomological Research*, 93(2): 115–124.
- Feng HQ, Wu KM, Ni YX, Cheng DF, Guo YY, 2005. High-altitude windborne transport of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in mid-summer in northern China. *Journal of Insect Behavior*, 18(3): 335–349.
- Holland RA, Wikelski M, Wilcove DS, 2006. How and why do insects migrate? *Science*, 313(5788): 794–796.
- Jiang YY, 2006. Perspective and research of observation on migration of insect pests with radar. *China Plant Protection*, 26(4): 17–18. [姜玉英, 2006. 雷达监测农作物迁飞性害虫研究与应用前景. 中国植保导刊, 26(4): 17–18]
- Magor JJ, 1995. Forecasting migrant insect pests. In: Drake VA, Gatehouse AG eds. Insect Migration: Tracking Resources through Space and Time. Cambridge University Press, Cambridge. 399–426.
- Riley JR, 1989. Remote sensing in entomology. *Annual Review of Entomology*, 34(1): 247–271.
- Riley JR, Reynolds DR, 1979. Radar-based studies of the migratory flight of grasshoppers in the middle Niger area of Mali. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 204(1154): 67–82.
- Riley JR, Reynolds DR, 1983. A long-range migration of grasshoppers observed in the Sahelian zone of Mali by two radars. *Journal of Animal Ecology*, 52(1): 167–183.
- Riley JR, Reynolds DR, 1997. Vertical-looking radar as means to improve forecasting and control of desert locusts. In: Krall S,

- Preveling R eds. New Strategies in Locust Control. Birkhauser Verlag, Basle. 47–52.
- Riley JR, Smith AD, Reynolds DR, 2003. The feasibility of using vertical-looking radar to monitor the migration of brown planthopper and other insect pests of rice in China. *Entomologia Sinica*, 10(1): 1–19.
- Rose DJW, Page WW, Dewhurst CF, Riley JR, Pedgley DE, Tucker MR, 1985. Downwind migration of the African army worm moth, *Spodoptera exempta*, studied by mark-and-capture and by radar. *Ecological Entomology*, 10(3): 299–313.
- Smith AD, Reynolds DR, Riley JR, 2000. The use of vertical-looking radar to continuously monitor the insect fauna flying at altitude over southern England. *Bulletin of Entomological Research*, 90(3): 265–277.
- Smith AD, Riley JR, 1996. Signal processing in a novel radar system for monitoring insect migration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15(4): 267–278.
- Smith AD, Riley JR, Gregory RD, 1993. A method for routine monitoring of the aerial migration of insects by using a vertical-looking radar. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 340(1294): 393–404.
- Zhai BP, 1999. Tracking angels: 30 years of radar entomology. *Acta Entomologica Sinica*, 42(3): 315–326. [翟保平, 1999. 追踪天使——雷达昆虫学 30 年. 昆虫学报, 42(3): 315–326]
- Zhai BP, 2001. Entomological radar: from research to practice. *Journal of Remote Sensing*, 5(3): 231–240. [翟保平, 2001. 昆虫雷达: 从研究型到实用型. 遥感学报, 5(3): 231–240]
- Zhang YH, Chen L, Cheng DF, Tian Z, Jiang YY, Zhang YJ, 2008. Nocturnal migration of Coleoptera: Carabidae in North China. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(1): 108–115. [张云慧, 陈林, 程登发, 田喆, 姜玉英, 张跃进, 2008. 步甲夜间迁飞的研究. 中国农业科学, 41(1): 108–115]
- Zhang YH, Chen L, Cheng DF, Zhang YJ, Jiang YY, Jiang JW, 2007a. Radar observation and population analysis on the migration of the clover cutworm, *Scotogramma trifolii* Rottemberg (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50(5): 494–500. [张云慧, 陈林, 程登发, 张跃进, 姜玉英, 蒋金炜, 2007a. 旋幽夜蛾迁飞的雷达观测和虫源分析. 昆虫学报, 50(5): 494–500]
- Zhang YH, Qiao HB, Cheng DF, Sun JR, 2007b. Primary application of vertical-looking radar to tracking high-flying insects in China. *Plant Protection*, 33(3): 23–26. [张云慧, 乔红波, 程登发, 孙京瑞, 2007b. 垂直监测昆虫雷达空中昆虫监测的初步应用. 植物保护, 33(3): 23–26]

(责任编辑: 武晓颖)